

# 唯一的成功机会

## Adams仿真帮助好奇号探测车实现完美的火星着陆

采自 JPL 负载与动态仿真团队负责人兼首席工程师 Chia-Yen Peng 博士的专访



火星科学实验室是一项机器人空间探测任务，于2012年8月5日实现了火星探测车好奇号在火星上的盖尔火山口（GaleCrater）成功着陆。空中起重机的着陆顺序要求探测车在下降时从收起的飞行形态转为着陆形态，从下降段开始放下车轮。在最后的进入、下降及空中起重机着陆阶段，由于其复杂性以及无法从地球上进行人工干预，因此被NASA的工程师们称作“惊险7分钟”。

NASA喷气推进实验室（JPL）的工程师们使用MSC软件的多体动力学软件Adams对最后的空中起重机着陆顺序进行了仿真。该仿真找出了初始概念设计中的众多问题，并且在工程师们解决这些问题时给予指导，使设计更为扎实可靠。该仿真还被用于验证着陆顺序并确定施加在组件和零部件上的荷载。用于在整个空中起重机着陆顺序中引导任务的控制软件代码被集成到Adams环境中以便验证其性能并进行微调。此次任务的成功证明了这些仿真的准确性。

### 复杂的着陆顺序

与之前的勇气号和机遇号火星探测车相比，好奇号探测车要长两倍、重五倍。在火星上着陆如此之大的有效载荷绝对是个挑战，这是由于火星上的大气过于稀薄，无法保证降落伞和空气动力制动的有效性，但火星大气稠密度容易导致火箭减速时出现稳定性和撞击问题。此外，好奇号探测车900千克的重量过于沉重，无法使用空气囊来缓冲着陆冲击。另一项挑战是从火星向地球传输无线电信号需要14分钟的行程，这意味着在整个着陆顺序中，飞船必须在不受地球交互式控制的情况下自主动作。

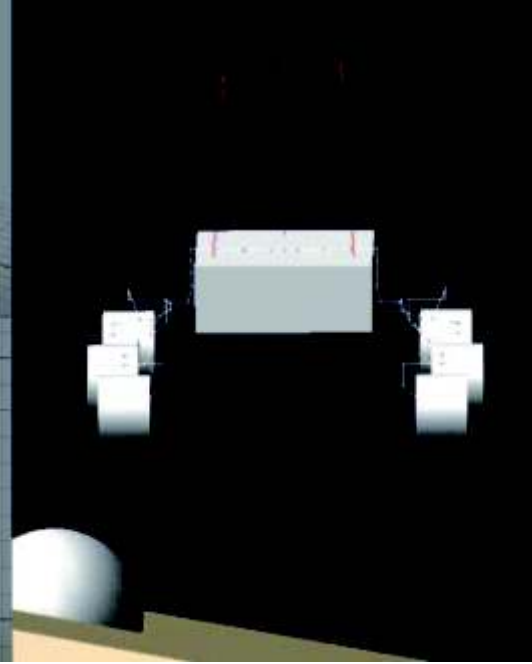
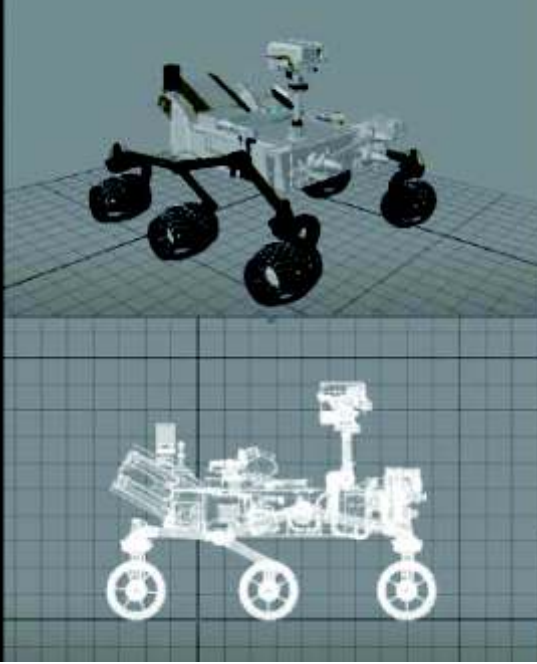
NASA的工程师们开发了一个独特的进入-下降-着陆系统来解决这一难题。减速舱含有防热罩、探测车、下降级、后挡板和降落伞，它在进入火星大气之前十分钟与巡航级分离，并将推进器点火，使防热罩朝向火星方向。减速舱在距离火星约10千米处将速度减慢至大约每秒578米，并在这一位置展开超

音速降落伞。

在约1.8千米高度，减速舱飞行速度为每秒100米时，探测车和下降级脱落。下降级将其火箭推进器点火，将速度减慢至每秒不到1米，并且用一根7.6米的系绳降下探测车，系绳由三条束带和一条向火星表面传送电信号的脐带电缆组成。当束带放线时，探测车的六个机动轮扣锁就位，准备着陆。着陆后，探测车引爆爆炸装置，启动电缆切割器，使其与下降级分离，下降级在距离探测车数百米远处坠毁。上午6:33，经确认探测车成功着陆。

### 唯一的成功机会

只有唯一的成功机会。复杂的顺序可以实现完美的工作，也可以导致探测车损毁，产生大量的火星尘埃，使整个任务失败。由于难以在地球上复制火星的重力、大气及着陆条件，因此工程师们无法在地球上进行着陆顺序试验。他们可以测试单个零部件，但唯一能够测试完整顺序并确定单个零部件上荷载



的方式就是仿真。编程工程师们一开始便认识到仿真的重要性，并且在整个项目的生命周期中，平均有三人专门从事多体动力学工作。

对探测车这一仿真中最为关键的部分，进行了高逼真度的建模，其中包括众多具有非线性刚度和阻尼特性的弹性元素。而下降级模型要简单得多，全部由刚性体构成。在项目开始时，采用单独的模型用于探测车的分离、移动布放以及触地阶段。在项目的后期，将所有模型合为一体。组合后的模型在四CPU惠普UNIX工作站上需运行17到93分钟。

## 针对结构设计确定荷载

由于需要确保其有能力承受荷载并成功执行任务，同时由于向火星迁移时重量增加会导致高昂的成本，需要最大限度地减轻重量，因此对有效荷载中的每个零部件进行优化设计至关重要。

Adams被用来预测作用在零部件和组件上的荷载，并且反过来利用这些荷载作为结构分析的输入，对设计进行优化，从而达到能够承受任务荷载的强度，同时最大限度地减小尺寸、减轻重量。建模的原理并不是要试图百分之百地准确预测每个事件，而是要确定有可能出现在每个零部件上的边界极限设计荷载。

在进行Adams仿真之前，JPL的工程师们认为，所设计的触地期间每秒

1米的最大速度不会在探测车上产生特别高的荷载，然而，仿真表明荷载要比预期高得多。还有，最初预测当探测车触及火星表面时会呈静态，但Adams仿真表明，事实上探测车在着陆时会旋转并摆动。因此对探测车的结构进行了强化以缓解这些问题。

后期研究也有其他的惊人发现，最初计划布放的探测车车轮和支承对某些探测车零部件产生的荷载甚至比触地还要高。仿真表明车轮端部会在探测车悬架和车架上产生类似于锤击的冲击。

JPL的工程师们通过改变车轮和支承布放的时机而解决了这一问题，而且通过改变车轮和支承布放的时机，还降低了触地前的摆动速度和摆动角度。

## 检查着陆顺序的其他方面

探测车与下降级分离时，最关键的一点是需要避免飞行器之间的接触。Adams仿真被用来检查空隙并确保不会发生接触。在最终设计中间隙非常小，但不会有接触问题。

飞行控制软件是采用C++语言编写。编写控制器软件的人需要一个详尽的机械模型，以便能够精确地预测系统性能。工程师们采用Adams求解程序来编译控制器，从而克服了这一问题。这样就能够验证系统性能并利用详尽的机械模型对控制器参数进行微调。JPL的工程师们将仿真结果与测试数据进行对比，对Adams模型进行验证和更新。

JPL的工程师们无法在地球上对大部分关键任务进行测试，因此须依靠仿真来为该任务设计大部分关键硬件和控制序列。仿真结果的精确性和缜密性帮助探测车成功而准确地踏上了这颗红色的星球。

图片来源：NASA/JPL——加州理工学院



# 进入、下降、着陆。

Adams仿真帮助好奇号探测车实现完美的火星着陆



## 1、启动着陆顺序

时速13,200英里的好奇号及其着陆飞船仅用了七分钟便减速至每小时2英里，并安全地在火星表面着陆。考虑到复杂的机动和顺序，好奇号能在初次尝试中就表现得完美无缺，可称得上是一个非凡的技术成就！

好奇号及其着陆飞船广泛采用MSC的Adams软件，以高水准的逼真度进行建模，包括许多柔性元素，一些柔性元素还包含非线性刚度和阻尼特性。

## 2、巡航转为进入

在进入之前九分钟，后壳推进器对飞船方向进行调整，使防热罩朝前，这一机动称为“转为进入”。进入后，后壳抛出两个固体钨配重，称为“巡航质量平衡装置”。抛出的装置每个重量约为165磅（75公斤），使飞船的质心发生变化。这使飞船能以一定的角度飞越大气层，产生升力。利用这一升力来“制导进入”，以便掌控大气层中不可预见的各种变数，并改进着陆的精度。

## 3、制导进入

由于飞船在最初与高层大气相互

作用，因此后壳上的推进器会调整角度和倾斜方向，使飞船沿着一系列“S”形曲线飞行。这些曲线可缩短飞船在下降时行经的水平距离。制导进入机动还能对由于风而导致的向左或向右偏移做出修正。

## 4、加热峰值

进入大气层八十秒后，防热罩达到任何进入火星的飞行器所能达到的最高温度，约为3,800华氏度（2,100摄氏度）。新型的酚碳热烧蚀板（PICA）热防护系统使好奇号的飞船壳体内部能够保持在32至77华氏度（0-25摄氏度）的适宜温度。在进入火星大气期间，PICA热防护材料将承受极为苛刻的热载荷和机械载荷环境。MSC软件公司的Marc被用于PICA防热瓦的热结构分析。

## 5、高超音速航空机动

以马赫数5飞行的7,000磅飞船会使大气层中的分子裂解，产生一个热等离子层。冲击波会造成空气密度和压力剧烈波动。飞船上制导算法通过调整滚转角来控制升力矢量的方向，从而使飞行器保持在要求的轨迹上。具体地说，

## 好奇号

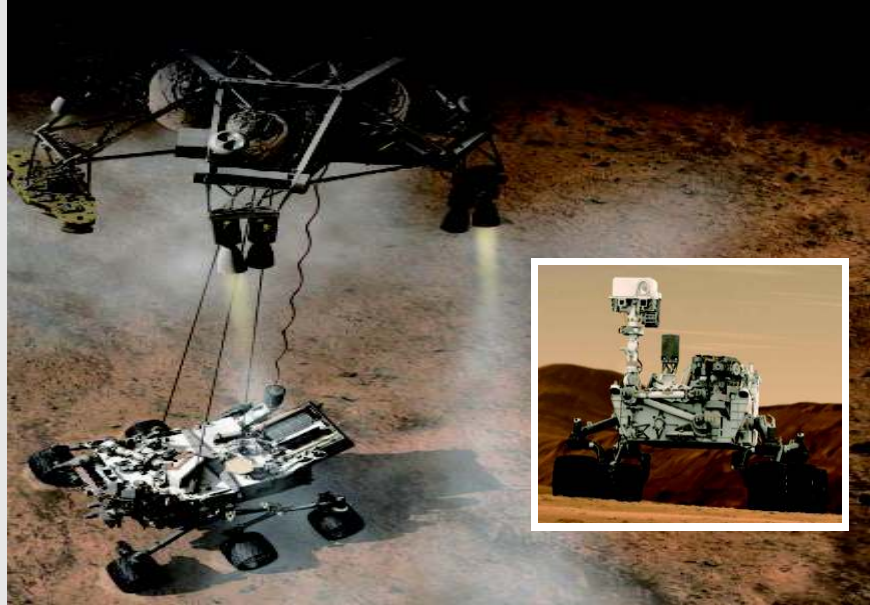
好奇号采用Adams软件建模，可实现极高水准的逼真度，包括许多柔性元素，一些柔性元素还包含非线性刚度和阻尼特性。在项目开始时，采用单独的模型用于探测车的分离、移动布放以及触地阶段。而在项目后期，将所有模型合为一体。组合后的模型在配备了四个中央处理器的惠普Packard UNIX工作站上运行17至93分钟。

## ADAMS

采用Adams预测作用在零部件和组件上的载荷，并且反过来利用这些载荷作为结构分析的输入，对设计进行优化，从而达到能够承受任务载荷的强度，同时最大限度地减小尺寸、减轻重量。建模的原理并不是要试图百分之百地准确预测每个事件，而是要确定有可能出现在每个零部件上的边界极限设计载荷。

## 设计洞察力

JPL的工程师们需要应对各种复杂情况，其中包括无法在地球上精确复现的火星重力、大气层、表面坡度及着陆速度，并且需要依赖各种仿真进行深入分析，这样才能对探测任务的完成充满信心。一系列的Adams仿真与设计同时进行——但从仿真出发，有助于指导设计趋于成熟，并可防范在执行任务期间由于潜在的恶劣载荷条件而导致的任何故障。



当飞船速度降至马赫数3以下时，进入航迹倾角必须严格保持在偏差仅为0.27度的范围内。

借助Adams的帮助可以达到极高的飞行精度。飞行控制软件采用C++语言编写，需要一个详尽的机械模型来精确地预测系统性能。工程师们采用Adams求解程序来编译控制器，从而克服了这一问题。这样就能够验证系统性能并利用详尽的机械模型对控制器参数进行微调。JPL的工程师们将仿真结果与测试数据进行比对，对Adams模型进行验证和更新。

## 6、降落伞展开

到达火星表面上空7英里（11千米）并以马赫数2的速度飞行时，将降落伞展开。这是为在这颗红色星球上着陆的行星探测任务而制造的史上最大的降落伞。由抛射器展开64.7英尺（19.7米）的盘缝带伞。主伞盘是一个圆顶状的伞盖，顶部有一个孔用来释放气压。主伞盖下方的缺口能够排出空气，以防伞盖破裂。使用期间可产生高达65,000磅（将近29,500公斤）的拖曳力，使飞船速度降至每小时250英里。

## 7、防热罩分离

在火星表面上空5英里（8千米）处，防热罩与飞船分离并坠落在火星表面上。防热罩脱离后，火星降落成像系统开始记录首个火星着陆影像。这段影像让我们以一个“漫游者的视角”快速接近火星表面，就好像我们自己与探测

器一起着陆一样。观看视频请访问：[www.mscsoftware.com/roverview](http://www.mscsoftware.com/roverview)。

## 8、雷达数据收集

好奇号降落时，通过六个独立脉冲多普勒雷达天线扫描火星表面。采用该雷达系统的距离读数来指示降落伞何时分离、反推火箭何时点火，以及探测车从降落阶段的何时开始下降。当探测车位于火星表面上空约1.2英里（3千米）时，工程师们就能成功地“锁定目标”。由于雷达只工作两分钟，其作用举足轻重，因此工程师们对其进行了超过100小时的测试，在莫哈韦沙漠和死亡谷地带将其从直升飞机上反复吊飞。

## 9、后壳分离及动力下降

在此阶段，飞船须执行一些在航天任务史上最具技术挑战性的机动。幸运的是，由于此前采用MSC的Adams多体动力仿真软件对该顺序进行了分析，因此这并非完全是“疯狂的冒险”。例如，探测车与下降级分离时，最关键的一点是需要避免飞行器部件之间的接触。在间或剧烈的动作期间，采用Adams仿真检查空隙并确保不会发生接触。在最终设计中，留出了极小的间隙，但不会发生接触。

## 10、空中起重机

在火星表面上空约66英尺（约20米）的高度，飞船使用了“空中起重机”——这要求探测车从收起的飞行形态转变为着陆形态，同时从下降级通过

吊索放下车轮降落到火星上。JPL的工程师们采用Adams来预测分离和下降顺序中的动力学特性。例如，当束带展开、探测车的六个机动轮锁闭就位准备着陆时，Adams仿真显示，这一“锁闭”作用在某些探测车部件上产生的载荷甚至超过了触地时的载荷。仿真结果显示车轮展开结束时，会在探测车悬架和框架上产生类似于锤击的严重冲击。JPL的工程师们改变了车轮和支承展开的时机，从而解决了这一问题。通过改变车轮和支承展开的时机，还降低了触地前的摆动速度和摆动角度。

## 11、触地

随着好奇号缓缓下降，最终触及火星表面。在进行Adams仿真之前，JPL的工程师们认为，所设计的触地期间每秒1米的最大速度不会在探测车上产生极高的载荷。但是仿真显示，载荷要比预期高得多。最初的预测是，当探测车触及火星表面时会呈静态；但Adams仿真显示，事实上探测车在着陆时会旋转并摆动。因此对探测车的结构进行了强化以缓解这些问题。

## 12、飞离

当下降级检测到触地时，迸发电荷切断束带和“脐带”。随着这一最终指令及释放动作，此后下降级不再访问探测车的计算机“中枢”。下降级结束其使命后“失去意识”，飞到一边并落在火星上距离好奇号数百码之外。